饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马营养物质消化代谢和血浆生理生化指标的影响[1]

于全平　王贤东　方美烟　陈　勇*

（新疆农业大学动物科学学院，乌鲁木齐 830052）

摘　要：本试验旨在探讨饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马体重、胸围、营养物质表观消化率和代谢以及血浆生理生化指标的影响，为确定泌乳期伊犁母马钙、磷适宜需要量提供参考。选取年龄（11~14 周岁）、体重[（371±21） kg]和胎次（4~6 胎）接近的处于第 2 泌乳月的伊犁母马 25 匹，随机分为 5 组，每组 5 个匹。第 3 泌乳月Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ组母马钙饲喂水平分别为 45.03、48.50、51.96、55.43 和 58.89 g/d，磷饲喂水平分别为 30.05、32.03、34.01、35.99 和 37.97 g/d；第 4 和第 5 泌乳月Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ组母马钙饲喂水平分别为 43.60、46.42、49.25、52.07 和 54.92 g/d，磷饲喂水平分别为 27.63、29.24、30.86、32.47 和 34.12 g/d。试验为期 90 d，每 30 d 为 1 个试验周期。结果显示：饲粮钙、磷水平对母马体重和胸围无显著影响（$P>0.05$）。饲粮钙、磷水平对干物质、有机物和中性洗涤纤维的表观消化率无显著影响（$P>0.05$）。Ⅴ组的粗蛋白质表观消化率最高，分别比Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ组提高 12.26%、12.37%和 18.28%（$P<0.05$）；Ⅰ组的总能表观消化率最高，分别比Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ组提高 8.32%、7.19%和 11.24%（$P<0.05$）；Ⅰ和Ⅲ组的钙表观消化率分别较Ⅳ组提高 17.74%和 14.49%（$P<0.05$）；Ⅲ组的磷表观消化率最高，比Ⅱ组提高 35.39%（$P<0.05$）。饲粮钙、磷水平对母马氮和钙代谢均无显著影响（$P>0.05$）。Ⅰ组的代谢能较Ⅱ和Ⅳ组分别增加 7.95%和 11.33%（$P<0.05$）；Ⅰ组的能量沉积率较Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ组分别提高 9.30%、8.50%和 12.10%（$P<0.05$）；Ⅰ、Ⅲ和Ⅴ组的磷沉积量显著高于Ⅱ组（$P<0.05$），其中Ⅲ组在各组中最高，比Ⅱ组提高 42.59%；Ⅰ和Ⅲ组的磷沉积率显著高于Ⅱ和Ⅳ组（$P<0.05$），其中Ⅰ组在各组中最高，分别比Ⅱ和Ⅳ组提高 49.67%和 46.32%；Ⅰ、Ⅲ和Ⅴ组的磷利用率显著高于Ⅱ组（$P<0.05$），分别比Ⅱ组提高 17.74%、18.80%和 16.79%。饲粮钙、磷水平对血浆中离子钙、磷、降钙素、骨钙素、胎盘催乳素、垂体泌乳素、雌二醇、孕酮和雌酮水平均无显著影响（$P>0.05$）。Ⅲ组的血浆中甲状旁腺素水平显著高于Ⅳ和Ⅴ组

收稿日期：2017-01-13

基金项目：国家科技支撑计划课题（2012BAD45B02）

作者简介：于全平（1989-），男，河北邯郸人，硕士研究生，从事草食动物营养与饲料的研究与开发。E-mail: 474643549@qq.com

*通信作者：陈　勇，教授，博士生导师，E-mail： xjaucy@163.com

（P<0.05），分别提高 70.61%和 47.58%。由此得出，Ⅰ组饲粮（在第 3 泌乳月钙、磷饲喂水平分别为 45.03 和 30.05 g/d，第 4 和第 5 泌乳月钙、磷饲喂水平分别为 43.60 和 27.63 g/d）即可满足伊犁母马泌乳期的钙、磷需要。适宜的饲粮钙、磷水平有助于维持较高水平的能量和钙的表观消化率以及能量和磷的沉积和利用。

关键词：伊犁母马；钙；磷；消化；代谢；激素

中图分类号：S816 文献标识码：A 文章编号：

钙和磷是动物体内必需、含量最多的常量矿物元素，约占马机体矿物质含量的 70%。相比其他矿物元素，马更容易缺乏钙、磷。合适的钙磷比对马骨骼的正常发育非常重要，钙、磷供应不足或比例失当，易导致骨骼变形[1]。马饲粮钙、磷水平的理想比例为（1.2~1.6）:1.0[2]。母马的矿物质需求包括胎儿的形成、泌乳及母马本身的生长与维持等，其在妊娠的最后 3 个月和哺乳期对矿物质的需求明显增加。母马的泌乳高峰在产后第 3 月，哺乳期间钙摄入不足可能会动员骨钙以满足需求，如果在数周内未得到改善，可能产生不可逆的影响[3]。母畜在泌乳早期每天净损失大量的钙，在泌乳中、后期钙的缺乏会影响磷的需要[4]。研究发现，饲粮钙、磷水平不仅影响钙、磷的消化代谢，也影响饲粮其他营养物质，如中性洗涤纤维（NDF）和酸性洗涤纤维（ADF）的消化代谢[5-6]，而关于饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马消化代谢的影响还未见报道。

研究发现，在妊娠后期增加饲粮钙、磷水平不影响妊娠后期伊犁母马营养物质的消化代谢，但血浆中雌二醇和雌酮的水平降低，而生长激素的水平增加[7]。而泌乳期饲粮钙、磷水平对伊犁母马营养物质的消化代谢和血液生理生化指标有何影响还未见报道。鉴于钙、磷营养的重要性，本试验将探讨饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马体重、胸围、消化代谢和血浆生理生化指标的影响，为确定泌乳期伊犁母马钙、磷适宜需要量提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验动物、饲粮及饲养管理

选取年龄（11~14 周岁）、体重[（371±21） kg]和胎次（4~6 胎）接近的处于第 2 月泌乳月末的伊犁母马 25 匹，随机分为 5 组，每组 5 匹。试验为期 90 d，每 30 d 为 1 个试验周期，

其中第 3 泌乳月预试期 12 d，每个泌乳月最后 12 d 为采样期。试验期间各组饲粮组成及营养水平见表 1。试验期间动物的饲养管理、各泌乳月饲粮饲喂量与于全平等[8]的报道相同。根据饲粮组成和饲喂量计算，第 3 泌乳月时，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ组母马钙饲喂水平分别为 45.03、48.50、51.96、55.43 和 58.89 g/d，磷饲喂水平分别为 30.05、32.03、34.01、35.99 和 37.97 g/d；第 4 和第 5 泌乳月时，Ⅰ、Ⅱ、Ⅲ、Ⅳ和Ⅴ组母马钙饲喂水平分别为 43.60、46.42、49.25、52.07 和 54.92 g/d，磷饲喂水平分别为 27.63、29.24、30.86、32.47 和 34.12 g/d。

表 1 饲粮组成及营养水平（风干基础）

Table 1 Composition and nutrient levels of diets (air-dry basis) %

项目 Items	第 3 泌乳月 The 3rd month of lactation					第 4 和第 5 泌乳月 The 4th and 5th month				
	Ⅰ组 Group Ⅰ	Ⅱ组 Group Ⅱ	Ⅲ组 Group Ⅲ	Ⅳ组 Group Ⅳ	Ⅴ组 Group Ⅴ	Ⅰ组 Group Ⅰ	Ⅱ组 Group Ⅱ	Ⅲ组 Group Ⅲ	Ⅳ组 Group Ⅳ	Ⅴ组 Group Ⅴ
原料 Ingredients										
苜蓿 Alfalfa hay	41.91	41.88	41.84	41.81	41.77	43.21	43.17	43.14	43.10	43.06
小麦秸秆 Wheat straw	41.91	41.88	41.84	41.81	41.77	43.20	43.17	43.13	43.10	43.07
玉米 Corn	9.52	9.51	9.50	9.50	9.49	7.98	7.98	7.98	7.98	7.99
大麦 Barley	4.65	4.65	4.65	4.64	4.64	3.91	3.91	3.91	3.91	3.91
豆粕 Soybean meal	1.48	1.48	1.48	1.48	1.48	1.25	1.25	1.25	1.25	1.25
磷酸氢钙 $CaHPO_4$	0.17	0.23	0.3	0.36	0.43	0.14	0.20	0.25	0.31	0.36
石粉 Limestone	0	0.01	0.03	0.04	0.06	0	0.01	0.03	0.04	0.05
L-赖氨酸盐酸盐 *L*-Lys•HCl	0.13	0.13	0.13	0.13	0.13	0.11	0.11	0.11	0.11	0.11
食盐 NaCl	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
预混料 Premix1)	0.16	0.16	0.16	0.16	0.16	0.14	0.14	0.14	0.14	0.14
合计 Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
营养水平 Nutrient levels2)										
消化能 DE/(MJ/kg)	7.04	7.03	7.03	7.02	7.02	6.88	6.88	6.87	6.86	6.86
粗蛋白质 CP	8.99	8.99	8.98	8.97	8.96	8.94	8.94	8.93	8.92	8.91
赖氨酸 Lys	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48	0.46	0.46	0.46	0.46	0.46
钙 Ca	0.27	0.29	0.31	0.33	0.35	0.27	0.29	0.30	0.32	0.34
磷 P	0.18	0.19	0.20	0.21	0.23	0.17	0.18	0.19	0.20	0.21

1)每千克预混料含有 One kg of premix contained the following：Co (as cobalt chloride) 18.50 mg，Cu (as copper sulfate) 3.70 g，I (as potassium iodide) 0.13 g，Mn (as manganese sulfate) 14.80 g，Se (as sodium selenite) 37.00 mg，Zn (as zinc sulfate) 14.80 g，Fe (as ferrous sulfate) 18.50 g，VA 880 000 IU，VD 95 000 IU，VE 30 000 000 IU，VB_1 1.10 g，VB_2 0.75 g。

2)营养水平均为计算值。Nutrient levels were calculated values.

1.2 样品采集

试验期内每 7 d 收集饲草料各 200 g 称重后密封保存。采用全收粪法收集马匹 24 h 的排粪

量，混匀后每天称取 200 g 的鲜粪自然阴干后备用；采用专门的孕马尿收集装置收集马匹 24 h 的排尿量，混匀后经 4 层纱布过滤，每天称取 80 g 于-20 ℃冷冻保存备用。粪样、尿样共收集 6 d，每个采样周期为连续采样 2 d 后，停止 2 d，共 3 个采样周期。

在每期试验结束后的第 2 天 08:00—09:00 时将马匹固定，采集空腹颈静脉血 10 mL 至肝素钠抗凝管中，于 3 500 r/min 离心 10 min，取血浆于-20 ℃冷冻保存待测。

1.3 测定指标与方法

每个试验周期末测定母马体重和胸围。饲草料和粪样中干物质（DM）、有机物（OM）、粗蛋白质（CP）、钙、磷以及尿样中钙、磷含量的测定均参照张丽英[9]的方法；饲草料和粪样中总能（GE）采用 OR2014 型高智能高精度量热仪测定，NDF 含量采用 ANKOM A2000i 型纤维测定仪测定。

血浆中离子钙（Ca^{2+}）、磷水平采用比色法测定，甲状旁腺素（PTH）、降钙素（CT）、骨钙素（BGP）、胎盘催乳素（PL）、垂体泌乳素（PRL）、雌二醇（E_2）、孕酮（P）、雌酮（E_1）水平均采用放射免疫法测定。所有试剂盒均由北京华英生物技术研究所提供。

1.4 数据处理与统计分析

数据采用 SPSS 18.0 软件的一般线性模型（GLM）模块进行双因素单响应变量方差分析。当因素水平达到显著后采用 Duncan 氏法对组间进行多重比较，显著水平为 P<0.05。

2 结果与分析

2.1 饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马体重、胸围的影响

由表 2 可知，饲粮钙、磷水平对母马的体重和胸围无显著影响（P>0.05）；泌乳月份对母马的体重和胸围有显著影响（P<0.05），随着泌乳期的延长，母马的体重和胸围增加；对于母马的体重和胸围，饲粮与泌乳月份间无显著的互作效应（P>0.05）。

2.2 饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马营养物质表观消化率的影响

由表 3 可知，饲粮钙、磷水平对母马 DM、OM 和 NDF 的表观消化率无显著影响（P>0.05），随饲粮钙、磷水平的增加，DM 和 OM 的表观消化率呈下降趋势（P=0.061 和 P=0.094）。Ⅴ组的 CP 表观消化率最高，分别比Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ组高 12.26%、12.37%和 18.28%（P<0.05）；Ⅰ组的

GE 表观消化率最高，分别比Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ组高 8.32%、7.19%和 11.24%（$P<0.05$）；Ⅰ和Ⅲ组的钙表观消化率分别较Ⅳ组提高 17.74%和 14.49%（$P<0.05$）；Ⅲ组的磷表观消化率最高，比Ⅱ组高 35.39%（$P<0.05$）。除表观消化率外，泌乳月份对其他营养物质的表观消化率均有显著影响（$P<0.05$），其中第 4 泌乳月的营养物质（CP 和 NDF 除外）表观消化率均显著低于第 3 和第 5 泌乳月（$P<0.05$）。饲粮与泌乳月龄对 CP、GE、钙和磷的表观消化率存在显著的互作效应（$P<0.05$）。

2.3 饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁马营养物质代谢的影响

由表 4 可知，饲粮钙、磷水平对母马氮和钙的代谢均无显著影响（$P>0.05$）。Ⅰ组的代谢能（ME）较Ⅱ和Ⅳ组分别增加 7.95%和 11.33%（$P<0.05$）；Ⅰ组的能量沉积率较Ⅱ、Ⅲ和Ⅳ组分别提高 9.30%、8.50%和 12.10%（$P<0.05$）；Ⅰ、Ⅲ和Ⅴ组的磷沉积量显著高于Ⅱ组（$P<0.05$），其中Ⅲ组在各组中最高，比Ⅱ组提高 42.59%；Ⅰ和Ⅲ组的磷沉积率显著高于Ⅱ和Ⅳ组（$P<0.05$），其中Ⅰ组在各组中最高，分别比Ⅱ和Ⅳ组提高 49.67%和 46.32%；Ⅰ、Ⅲ和Ⅴ组的磷利用率显著高于Ⅱ组（$P<0.05$），分别比Ⅱ组提高 17.74%、18.80%和 16.79%。除氮代谢外，泌乳月份对其他营养物质的代谢均有显著影响（$P<0.05$），其中第 4 泌乳月的 ME、能量沉积率、钙沉积量、钙沉积率、钙利用率、磷沉积量、磷沉积率均显著低于第 3 和第 5 泌乳月（$P<0.05$）；第 4 泌乳月的可消化能利用率显著低于第 5 泌乳月（$P<0.05$）；第 4 和第 5 泌乳月的磷利用率显著低于第 3 泌乳月（$P<0.05$）。除磷代谢外，其他营养物质的代谢在饲粮与泌乳月龄间均存在显著的互作效应（$P<0.05$）。由此可见，本试验条件下，Ⅰ组饲粮的钙、磷水平已能满足泌乳期伊犁母马的需要。

2.4 饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马血浆中离子钙、磷及钙离子代谢相关激素水平的影响

由表 5 可知，饲粮钙、磷水平对母马血浆中离子钙、磷、CT 和 BGP 水平均无显著影响（$P>0.05$）。Ⅲ组血浆中 PTH 水平显著高于Ⅳ和Ⅴ组（$P<0.05$），分别高 70.61%和 47.58%。泌乳月份对血浆中磷、PTH 和 CT 水平均有显著影响（$P<0.05$），其中第 3 泌乳月的磷和 CT 水平最高，而 PTH 水平最低。饲粮与母马泌乳月龄间对血浆中离子钙水平存在显著的互作效应（$P<0.05$）。

2.5 饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马血浆中生殖激素水平的影响

由表 5 可知，饲粮钙、磷水平对伊犁马血浆中 PL、PRL、E_2、P 和 E_1 水平均无显著影响（$P>0.05$），随饲粮钙、磷水平的增加，血浆中 PRL 水平呈升高趋势（$P=0.059$）。泌乳月份对血浆中 PL、E_2、P 和 E_1 水平有显著影响（$P<0.05$），其中第 4 泌乳月的 PL 水平最高，而 E_1、E_2 和 P 水平最低。饲粮与泌乳月龄对血浆中 PL、PRL 和 P 水平存在显著的互作效应（$P<0.05$）。

表 2　饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马体重和胸围的影响

Table 2　Effects of dietary calcium and phosphorus levels on body weight and heart girth of *Yili* mares during lactation period

项目 Items	组别 Groups					泌乳月份 Month of lactation			SEM	*P* 值 *P*-value		
	I	II	III	IV	V	第 3 3rd	第 4 4th	第 5 5th		D	ML	D×ML
体重 Body weight /kg	386.00	402.27	410.93	405.47	395.47	395.52^{b}	392.80^{b}	411.76^{a}	3.03	0.091	0.024	0.999
胸围 Heart girth/cm	176.56	174.42	178.45	175.56	176.41	169.98^{c}	176.87^{b}	181.98^{a}	0.85	0.372	<0.001	0.457

D：饲粮效应；ML：泌乳月份效应；D×ML：饲粮与泌乳月份组合效应。同一因素内，同行数据肩标不同小写字母表示差异显著（*P*<0.05）。下表同。

D: effect of diet; ML: effect of lactation month; D×ML: combination effect of diet and lactation month. Within the same factor, values in the same row with different small letter superscripts mean significant difference (*P*<0.05). The same as below.

表 3　饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马营养物质表观消化率的影响

Table 3　Effects of dietary calcium and phosphorus levels on nutrient apparent digestibility of *Yili* mares during lactation period　%

项目 Items	组别 Groups					泌乳月份 Month of lactation			SEM	*P* 值 *P*-value		
	I	II	III	IV	V	第 3 3rd	第 4 4th	第 5 5th		D	ML	D×ML
干物质 DM	53.74	50.13	51.17	48.69	51.65	52.02^{a}	48.44^{b}	52.76^{a}	0.62	0.061	0.004	0.080
有机物 OM	55.19	51.57	52.72	50.72	53.33	54.00^{a}	49.81^{b}	54.30^{a}	0.61	0.094	0.001	0.086
粗蛋白质 CP	71.01^{ab}	66.29^{b}	66.23^{b}	62.92^{b}	74.42^{a}	69.10	64.94	70.48	1.38	0.028	0.146	0.004
中性洗涤纤维 NDF	42.63	38.87	39.57	37.24	40.16	39.46	39.49	40.13	0.77	0.230	0.916	0.086
总能 GE	52.47^{a}	48.44^{b}	48.95^{b}	47.17^{b}	49.85^{ab}	51.53^{a}	46.21^{b}	50.40^{a}	1.22	0.032	<0.001	0.040
钙 Ca	55.00^{a}	50.94^{ab}	56.56^{a}	48.04^{b}	50.84^{ab}	53.63^{a}	45.28^{b}	57.91^{c}	1.23	0.029	<0.001	<0.001
磷 P	27.33^{ab}	22.66^{b}	30.68^{a}	26.76^{ab}	29.73^{ab}	29.79^{a}	20.41^{b}	30.94^{a}	1.03	<0.001	0.008	<0.001

表 4　饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马能量、氮、钙和磷代谢的影响

Table 4　Effects of dietary calcium and phosphorus levels on metabolism of energy, N, Ca and P of *Yili* mares during lactation period

项目 Items	组别 Groups					泌乳月份 Month of lactation			SEM	*P* 值 *P*-value		
	I	II	III	IV	V	第 3 3rd	第 4 4th	第 5 5th		D	ML	D×ML
氮沉积量 N retention/(g/d)	94.04	83.23	72.33	91.96	103.01	95.69	75.37	95.83	4.68	0.200	0.091	0.015
氮沉积率 N retention rate/%	36.07	31.19	27.39	34.79	38.80	35.24	28.85	36.87	1.77	0.195	0.108	0.015
可消化氮利用率 Digestible N utilization rate/%	49.48	46.09	39.39	52.22	50.24	48.91	42.39	51.02	2.05	0.278	0.162	0.032
代谢能 ME/(MJ/d)	128.63^{a}	119.16^{b}	119.62^{ab}	115.54^{b}	121.79^{ab}	128.03^{a}	112.19^{b}	122.62^{a}	1.68	0.048	<0.001	0.020
能量沉积率 Energy retention rate/%	50.67^{a}	46.36^{b}	46.70^{b}	45.20^{b}	47.98^{ab}	49.44^{a}	44.16^{b}	48.55^{a}	0.65	0.025	<0.001	0.035
可消化能利用率 DE utilization rate/%	96.38^{a}	95.66^{bc}	95.34^{c}	95.81^{abc}	96.23^{ab}	95.90^{ab}	95.50^{b}	96.25^{a}	0.11	0.006	0.009	0.041
钙沉积量 Ca retention/(g/d)	60.26	55.18	62.94	58.36	57.36	60.17^{a}	52.12^{b}	63.66^{a}	1.22	0.093	<0.001	0.006
钙沉积率 Ca retention rate/%	35.63	32.88	36.83	32.79	30.89	37.67^{a}	26.41^{b}	36.93^{a}	1.33	0.377	<0.001	0.010
钙利用率 Ca utilization rate/%	63.55	63.65	64.38	62.28	58.05	70.27^{a}	53.98^{b}	62.24^{a}	1.81	0.651	<0.001	0.003
磷沉积量 P retention/(g/d)	9.05^{a}	6.95^{b}	9.91^{a}	8.21^{ab}	9.71^{a}	9.64^{a}	6.09^{b}	10.34^{a}	0.39	0.022	<0.001	0.909
磷沉积率 P retention rate/%	26.85^{a}	17.94^{b}	26.33^{a}	18.35^{b}	24.00^{ab}	27.71^{a}	14.10^{b}	25.53^{a}	1.36	0.030	<0.001	0.628
磷利用率 P utilization rate/%	80.77^{a}	68.60^{b}	81.50^{a}	73.45^{ab}	80.12^{a}	92.59^{a}	67.43^{b}	68.39^{b}	2.29	0.013	<0.001	0.289

表 5　饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马血浆生理生化指标的影响

Table 5　Effect of dietary calcium and phosphorus levels on plasma physiological-biochemical indices of *Yili* mares during lactation period

项目 Items	组别 Groups					泌乳月份 Month of lactation			SEM	*P* 值 *P*-value		
	I	II	III	IV	V	第 3 3rd	第 4 4th	第 5 5th		D	ML	D×ML
离子钙 Ca^{2+}/(mmol/L)	0.81	0.86	0.83	0.89	0.92	0.86	0.81	0.91	0.02	0.564	0.185	0.003
磷 P/(mmol/L)	0.88	0.85	0.94	0.80	0.87	0.99^{a}	0.77b	0.85^{ab}	0.32	0.677	0.011	0.434
甲状旁腺素 PTH/(pg/mL)	50.04^{ab}	47.28^{ab}	59.49^{a}	34.87^{b}	40.31^{b}	36.08^{b}	53.18^{a}	49.93^{a}	2.88	0.043	0.022	0.156
降钙素 CT/(ng/L)	55.37	58.20	56.86	60.08	60.20	72.44^{a}	39.69^{b}	62.29^{a}	2.68	0.951	<0.001	0.419
骨钙素 BGP/(ng/mL)	5.07	5.15	4.97	5.21	5.21	5.09	4.99	5.28	0.07	0.813	0.272	0.918
胎盘催乳素 PL/(μg/mL)	1.39	1.43	1.41	1.36	1.35	1.17^{c}	1.58^{a}	1.42^{b}	0.03	0.491	<0.001	<0.001
垂体泌乳素 PRL/(μIU/mL)	128.30	119.82	148.71	139.18	139.96	142.10	131.93	131.56	3.58	0.059	0.326	0.029
雌二醇 E_2/(pg/mL)	42.71	40.80	40.50	42.66	41.07	40.48^{b}	35.67^{b}	48.49^{a}	1.42	0.975	0.001	0.885
孕酮 P/(ng/mL)	0.59	0.71	0.58	0.68	0.66	0.73^{a}	0.54^{b}	0.66^{a}	0.03	0.235	0.002	0.006

雌酮 E_1/(pmol/L)	159.71	152.75	150.29	158.88	152.02	152.62[b]	134.14[b]	177.43[a]	4.84	0.955	0.002	0.862

3 讨 论

3.1 饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁马体重、胸围的影响

本试验阶段母马已完成配种工作，随着泌乳期的延长，妊娠期也随之延长，子宫和子宫内容物重量增加，而胎儿前期增长缓慢、中后期增长较快。已有研究显示，饲喂不同钙、磷水平的饲粮对水牛[10]体重以及梅花鹿[11]的生长无显著影响。本研究结果表明，饲粮钙、磷水平对母马体重和胸围无显著影响，这与上述前人研究结果相似，说明饲粮钙、磷水平并不是影响泌乳期和妊娠早期母畜体增重的关键因素。随着泌乳期的延长，母马的体重和胸围在逐渐增加，这是由于处于泌乳期的母马同时也处于妊娠期，其体重和胸围的增加应归因于妊娠期间母马有较强的贮存营养物质的能力及胎儿的发育。通过对猪的研究发现，母体增重以前期为主，至妊娠中、后期，由于胎儿发育超过母体增重，此时母体能量和营养物质的沉积量显著下降[12]。

3.2 饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马营养物质消化代谢的影响

研究发现，饲粮中 DM 摄入量及营养物质的消化利用率等因素影响青年奶牛的生长发育速度，不同饲粮磷水平对 DM、CP 和 NDF 等的表观消化率均无显著影响[13]。本研究结果表明，饲粮钙、磷水平对伊犁母马 DM、OM 和 NDF 的表观消化率无显著影响，但是以Ⅴ组的 CP 表观消化率最高，可能是由于Ⅴ组饲粮钙、磷水平改善了进入动物体内营养物质的平衡，有效减少了粪氮及尿氮排出量，增加了氮的消化及沉积，从而提高了氮的利用率[14]。尚未见有关饲粮钙、磷水平对泌乳马能量消化代谢的报道，但本研究发现，Ⅰ组饲粮能量的表观消化率和马匹获得的 ME 较高，说明适宜的饲粮钙、磷水平有助于能量的消化和沉积。研究发现，随着饲粮钙、磷水平的升高，泌乳奶牛钙表观消化率显著下降，两者之间存在显著的线性负相关[15]。本研究表明Ⅲ组饲粮的钙、磷表观消化率均较高，与上述结果存在一定的差异，其原因有待进一步研究。

Kegley 等[16]研究表明，肉牛饲喂高钙饲粮时氮表观消化率、氮沉积量及氮沉积率均下降；而 Wheeler 等[17]报道饲粮钙水平对肉牛的 CP 表观消化率无显著影响，但高钙组较低钙组其钙、磷的沉积量高。本试验结果表明饲粮钙、磷水平对氮代谢无显著影响，这可能与试验动物种类、生理状态及钙、磷水平等有关。在母羊泌乳早期和妊娠末期提高饲粮钙、磷水平，其钙、磷的

沉积量均增加，磷沉积量的增加可能与钙沉积量的增加有关[18]。当水牛机体钙或磷出现负平衡时会动员骨骼钙或磷，而摄入过量钙或磷时钙、磷的利用率呈下降趋势[10]。另外，由于母马个体对饲料的消化力差异、生理状态和产奶量多少不同，动物对 CP、钙、磷等营养元素的消化利用受内源性循环代谢的影响亦较大。

3.3 饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马血浆中离子钙、磷及钙离子代谢相关激素水平的影响

血浆钙受 PTH、CT 和维生素 D_3 的精密调节。血液中钙水平发生变化时，骨盐可随时动员以维持血液钙水平正常，而当血液磷水平发生变化时，骨盐动员较慢[19]。血液钙水平是调节 PTH、CT 分泌的最主要因素，以负反馈的方式进行调节，甲状旁腺主细胞对血液钙水平极为敏感，只要有轻微下降，PTH 的分泌即可在 1 min 内迅速增加，使骨钙释放。研究表明，随着饲粮钙水平的升高，泌乳牛 PTH 的分泌量显著下降，而 CT 的分泌量则呈现明显的上升趋势[10]。但另有研究表明，饲粮钙、磷水平对梅花鹿血清钙、磷和镁水平无显著影响[11]。本试验结果发现，III 组母马血浆中 PTH 水平较高，而血浆离子钙、磷水平各组间均无显著差异，可能是 PTH 发挥了升血钙降血磷作用，以维持血钙和血磷的稳态。

BGP 仅由成骨细胞合成和分泌，是骨骼形成和更新的标志物，骨更新率越快，血液骨钙素水平越高；此外，PTH 下调 BGP 的合成[20]。无论是水牛[10]还是处于妊娠后期的伊犁马[7]，饲粮钙、磷水平对血浆 BGP 水平均无显著影响。本研究也发现，饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马血浆 BGP 水平也无显著影响，这表明本试验中钙、磷的饲喂水平已足以满足母马对钙、磷的维持和生产需要，在 PTH 和 BGP 的双重作用下维持血钙和血磷的稳态。

3.4 饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马血浆中生殖激素水平的影响

矿物质和维生素的缺乏会导致动物乏情，从而导致不孕。饲粮缺钙时，可引起母畜骨质疏松，严重时可导致胎儿发育受阻。奶牛若缺磷可导致卵巢萎缩、屡配不孕，其原因是磷不足使得胡萝卜素转化为维生素 A 的能力降低[12]。给母猪饲喂低钙、磷水平饲粮会减少窝产仔数[21]，而为放牧奶牛补饲钙磷结合素可明显改善繁殖性能[22]。有关饲粮钙、磷营养对泌乳马生殖激素水平影响的研究报道较少。研究发现，当饲粮钙水平在 36.00~48.00 g/d、磷水平在 26.30~34.30 g/d 之间时，增加饲粮钙、磷水平使妊娠后期伊犁马血浆中 E_1 和 E_2 水平降低[7]。然而，在本研究中

并未发现这一现象。这与马匹所处生理阶段和对钙、磷需要的特点有密切关系。一方面，与妊娠后期相比，泌乳期母马血浆中 E_1 和 E_2 等雌激素水平急剧下降；另一方面，母马在泌乳期对钙、磷的需要量显著增加，大量离子钙以乳钙形式排出，导致泌乳期母马血液中离子钙的水平明显低于妊娠后期。此外，高钙具有加速 E_1 分解的作用[23]，由于在泌乳期母马血浆中 E_1 等雌激素水平已经较低，因此对饲粮钙水平的响应不如妊娠期明显。

4 结　论

① 饲粮钙、磷水平对泌乳期伊犁母马体重、胸围，DM、OM 和 NDF 的表观消化率，氮和钙的代谢以及血浆中离子钙、磷、CT、BGP、PL、PRL、E_2、P 和 E_1 水平均无显著影响。

② Ⅰ组饲粮（在第 3 泌乳月钙、磷饲喂水平分别为 45.03 和 30.05 g/d，第 4 和第 5 泌乳月钙、磷饲喂水平为 43.60 和 27.63 g/d）即可满足伊犁母马泌乳期的钙、磷需要。

③ 适宜的饲粮钙、磷水平有助于维持较高水平的能量和钙的表观消化率以及能量和磷的沉积和利用。

参考文献：

[1] CAPLE I W,DOAKE P A,ELLIS P G.Assessment of the calcium and phosphorus nutrition in horses by analysis of urine[J].Australian Veterinary Journal,1982,58(4):125–131.

[2] NRC.Nutrient requirements of horses[S].6th ed.Washington,D.C.:National Academies Press,2007:1–300.

[3] SCHRYVER H F,HINTZ H F,LOWE J E.Calcium and phosphorus in the nutrition of the horse[J].Cornell Veterinarian,1974,64(4):493–515.

[4] BRAITHWAITE G D.Calcium and phosphorus requirements of the ewe during pregnancy and lactation:2.Phosphorus[J].British Journal of Nutrition,1983,50(3):723–736.

[5] 肖俊.热应激奶牛泌乳后期饲粮适宜钙、磷水平的研究[D].硕士学位论文.雅安:四川农业大学,2014:1–55.

[6] 许建海,张微,黄洁,等.饲粮磷水平对西门塔尔杂交后备母牛营养物质表观消化率的影响[J].动物营养学报,2011,23(4):589–596.

[7] 方美烟,漆雯雯,唐伟,等.饲喂不同钙、磷水平饲粮对妊娠后期伊犁马营养物质消化代谢和血浆生理生化指标的影响[J].动物营养学报,2016,28(9):2761–2770.

[8] 于全平,王贤东,漆雯雯,等.饲喂不同钙、磷水平饲粮对泌乳期伊犁马乳成分、乳脂脂肪酸组成和马驹生长发育、血浆生理生化指标的影响[J].动物营养学报,2016,28(8):2619–2629.

[9] 张丽英.饲料分析及饲料质量检测技术[M].3 版.北京:中国农业大学出版社,2007:48–193.
[10] 崔政安.泌乳水牛钙、磷代谢规律及需要量研究[D].硕士学位论文.南宁:广西大学,2011:1–65.
[11] 孙伟丽,赵海平,王晓旭,等.不同钙、磷水平饲粮对 12~15 月龄梅花鹿生长性能、营养物质消化率及钙、磷代谢的影响[J].动物营养学报,2016,28(12):3952–3961.
[12] 岳文斌,张建红.动物繁殖及营养调控[M].北京:中国农业出版社,2004:130–136.
[13] 孙国强,王书芝,吕永艳,等.饲粮磷含量对 11~15 月龄青年奶牛生长性能、血液指标和磷排泄的影响[J].动物营养学报,2015,27(12):3912–3919.
[14] 赵智力.内蒙古白绒山羊生长羯羊钙、磷需要量的研究[D].硕士学位论文.呼和浩特:内蒙古农业大学,2006:1–76.
[15] 初汉平.奶牛钙磷适宜供给量的研究[D].硕士学位论文.泰安:山东农业大学,2005:1–76.
[16] KEGLEY E B,HARVEY R W,SPEARS J W.Effects of lysocellin and calcium level on mineral metabolism,performance and ruminal and plasma characteristics of beef steers[J].Journal of Animal Science,1991,69(2):782–791.
[17] WHEELER W E,NOLLER C H,WHITE J L.Effect of level of calcium and sodium bicarbonate in high concentrate diets on performance and nutrient utilization by beef steers[J].Journal of Animal Science,1981,53(2):499–515.
[18] BRAITHWAITE G D,GLASCOCK R F,RIAZUDDIN S.Calcium metabolism in pregnant ewes[J].British Journal of Nutrition,1970,24(3):661–670.
[19] 王洪章,辛德颐.畜禽钙磷营养和代谢性疾病[M].北京:农业出版社,1988:4–7.
[20] LEE N K,SOWA H,HINOI E,et al.Endocrine regulation of energy metabolism by the skeleton[J].Cell,2007,130(3):456–469.
[21] 孙会,冀红芹,邹磊,等.猪钙营养需要量研究进展[J].饲料工业,2013,34(13):1–6.
[22] PHIRI E C J H,NKYA R,PEREKA A E,et al.The effects of calcium,phosphorus and zinc supplementation on reproductive performance of crossbred dairy cows in Tanzania[J].Tropical Animal Health and Production,2007,39(5):317–323.
[23] NAPOLI N,THOMPSON J,CIVITELLI R,et al.Effects of dietary calcium compared with calcium supplements on estrogen metabolism and bone mineral density[J].The American Journal of Clinical Nutrition,2007,85(5):1428–1433.

Effects of Dietary Calcium and Phosphorus Levels on Nutrient Digestion and Metabolism, Plasma Physiological-Biochemical Indices of *Yili* Mares during Lactation Period

YU Quanping　WANG Xiandong　FANG Meiyan　CHEN Yong*

*Corresponding author, professor, E-mail：xjaucy@163.com

(责任编辑　菅景颖)

（*College of Animal Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi* 830052）

Abstract: In order to provide references for confirming requirement of calcium (Ca) and phosphorus (P) for *Yili* mares during lactation period, the effects of dietary Ca and P levels on body weight, heart girth, nutrient apparent digestibility and metabolism and plasma physiological-biochemical indices were examined. Twenty-five *Yili* mares in their end of the 2nd lactation month with similar age (11 to 14 years old), body weight [(371±21) kg] and parity (4 to 6 parities) were selected, and allocated to five groups of 5 animals each. In the 3rd lactation month, the Ca feed level of mares in groups Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ and Ⅴ was 45.03, 48.50, 51.96, 55.43 and 58.89 g/d, and the P feed level was 30.05, 32.03, 34.01, 35.99 and 37.97 g/d, respectively. In the 4th and 5th lactation month, the Ca feed level of mares in groups Ⅰ, Ⅱ, Ⅲ, Ⅳ and Ⅴ was 43.60, 46.42, 49.25, 52.07 and 54.92 g/d, and the P feed level was 27.63, 29.24, 30.86, 32.47 and 34.12 g/d, respectively. The trial lasted for 90 days, and every 30 days for a test cycle. The results showed as follows: dietary Ca and P levels had no significant effects on body weight, heart girth and the apparent digestibility of dry matter (DM), organic matter (OM) and neutral detergent fiber (NDF) (P>0.05). The apparent digestibility of crude protein (CP) of group Ⅴ was the highest, and increased by 12.26%, 12.37% and 18.28% (P<0.05) as compared with group Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ, respectively. The apparent digestibility of gross energy (GE) of group Ⅰ was the highest, and increased by 8.32%, 7.19% and 11.24% (P<0.05) as compared with group Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ, respectively. The apparent digestibility of Ca of groups Ⅰ and Ⅲ was higher than that of group Ⅳ, and increased by 17.74% and 14.49% (P<0.05), respectively. The apparent digestibility of P of group Ⅲ was the highest, and increased by 35.39% (P<0.05) as compared with group Ⅱ. Dietary Ca and P levels had no significant effects on nitrogen and Ca metabolism (P>0.05). The metabolic energy (ME) of group Ⅰ was higher than that of groups Ⅱ and Ⅳ, and increased by 7.95% and 11.33% (P<0.05), respectively. The energy retention rate of group Ⅰ was higher than that of groups Ⅱ, Ⅲ and Ⅳ, and increased by 9.30%, 8.50% and 12.10% (P<0.05), respectively. The P retention of groups Ⅰ, Ⅲ, Ⅴ was significantly higher than that of group Ⅱ (P<0.05), and group Ⅲ was the highest among groups which increased by 42.59% (P<0.05) as compared with group Ⅱ. The P retention rate of groups Ⅰ and Ⅲ was significantly higher than that of groups Ⅱ and Ⅳ, and group Ⅰ was the highest among groups which increased by 49.67% and 46.32% (P<0.05) as compared with groups Ⅱ and Ⅳ, respectively. The P utilization rate of groups Ⅰ, Ⅲ and Ⅴ was significantly higher than that of group Ⅱ (P<0.05), and increased by 17.74%, 18.80% and 16.79% as compared with group Ⅱ, respectively. The levels of plasma ionized calcium (Ca^{2+}), P, calcitonin, bone gla protein, placental prolactin, pituitary prolactin, estradiol, progesterone and estrone showed no significant difference (P>0.05) when mares fed with different levels of dietary Ca and P. Moreover, the level of plasma

parathyroid hormone of group Ⅲ was significantly higher than that of groups Ⅳ and Ⅴ with an increase of 70.61% and 47.58% (P<0.05). In conclusion, diet Ⅰ (the Ca and P feed levels in the 3rd lactation month are 45.03 and 30.05 g/d and those in the 4th and 5th lactation month are 43.60 and 27.63 g/d, respectively) can meet the Ca and P requirements of *Yili* mares during lactation period. Suitable dietary Ca and P levels are beneficial to maintain higher apparent digestibility of gross energy and Ca, retention and utilization of P and energy.

Key words: *Yili* mare; calcium; phosphorus; digestion; metabolism; hormones